



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116358882 B

(45) 授权公告日 2024. 03. 22

(21) 申请号 202310373772.9

(22) 申请日 2023.04.10

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116358882 A

(43) 申请公布日 2023.06.30

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 林鑫 罗家泉 王泽众 王若岩
李飞 余西龙

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.
G01M 15/10 (2006.01)

(56) 对比文件

- US 2013247576 A1, 2013.09.26
- JP 2021039065 A, 2021.03.11
- CN 115077714 A, 2022.09.20
- CN 115853675 A, 2023.03.28
- CN 101915618 A, 2010.12.15
- CN 113724194 A, 2021.11.30
- US 2020033001 A1, 2020.01.30
- US 5659133 A, 1997.08.19

审查员 白冰

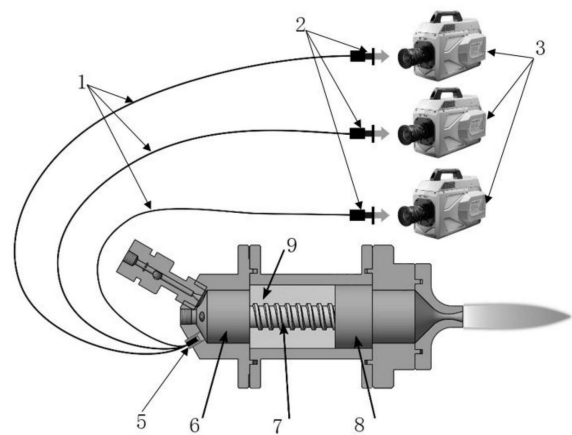
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法
方法及系统

(57) 摘要

本发明提供了一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法及系统,方法包括:使用高速相机在包括化学发光物质对应波长的多波长下对标准黑体炉成像,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在多波长下每个波长处的辐射强度,得到高速相机在相应波长下的响应;使用高速相机采集固液火箭发动机燃烧室内的火焰在多个波长下每个波长处辐射信号的图像;根据高速相机在相应波长下的响应,拟合出化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,结合化学发光物质对应波长处的火焰图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。本发明还提供了基于上述方法的系统,解决了现有技术中获得的固液火箭发动机燃烧室内火焰图像含有黑体辐射、化学发光图像不真实的问题。



1. 一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法,其特征在于,所述研究方法包括:

步骤100.使用高速相机在包括化学发光物质对应波长的多波长下对标准黑体炉成像,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在多波长下每个波长处的辐射强度,得到所述高速相机在相应波长下的响应;

步骤200.使用所述高速相机采集固液火箭发动机燃烧室内的火焰在多个波长下每个波长处辐射信号的图像;

步骤300.根据所述高速相机在相应波长下的响应,拟合出化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,结合化学发光物质对应波长处的火焰图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射;

所述研究方法还包括滤除黑体辐射的方法:

将至少两个只含有黑体辐射的图像分别除以对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在对应波长下的黑体辐射强度;

根据对应波长下的黑体辐射强度,结合理论黑体辐射曲线,拟合得到黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度;

黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度乘以化学发光物质对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像;

化学发光物质对应波长处的火焰图像减去化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,能够滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

2. 根据权利要求1所述的一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法,其特征在于,

每个波长对应于一个中心波长的滤光片,所述多波长包括多组含有不同化学发光物质对应波长的滤光片,每组滤光片包括一种化学发光物质对应波长的滤光片和其波长相邻的至少两个只透过黑体辐射信号的、波长不同的滤光片。

3. 根据权利要求2所述的一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法,其特征在于,

所述高速相机经过每组滤光片采集的固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像包括含有一种化学发光物质信号和黑体辐射信号的火焰图像、至少两个只含有黑体辐射信号的火焰图像。

4. 根据权利要求1所述的一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法,其特征在于,

所述高速相机由所述固液发动机的点火信号同步触发。

5. 一种基于权利要求1-4任一项所述的固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法的研究系统,其特征在于,所述研究系统包括:

不同波长的多组滤光片,其波长范围包括对应于化学发光物质及其临近的波长;

高速相机,通过成像光纤连接每个滤光片,以采集不同波长下每个波长处的图像;

标准黑体炉,通过所述高速相机在不同波长下对所述标准黑体炉成像,得到所述标准黑体炉在不同波长下图像的像素值;

固液火箭发动机,所述成像光纤能够安装在所述固液发动机的壁面内,通过所述高速相机采集与所述标准黑体炉相同波长下的固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像;

图像拟合模块,连接所述高速相机并接受采集的图像,利用所述标准黑体炉在不同波长下图像的像素值,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在不同波长下每个波长处的辐射强度,得到所述高速相机在相应波长下的响应;

图像处理模块,连接所述图像拟合模块,基于所述高速相机在相应波长下的响应,利用临近化学发光物质对应波长处的火焰图像,拟合得到黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度,结合化学发光物质对应波长下的响应,得到固液发动机燃烧室内火焰在化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

6. 根据权利要求5所述的研究系统,其特征在于,

所有滤光片的带宽相同,波长不同,每组滤光片的波长范围覆盖一种化学发光物质对应的波长。

7. 根据权利要求6所述的研究系统,其特征在于,

每组所述滤光片的数量至少为3个,其中一个为透过一种化学发光信号的波长,至少两个是与所述透过一种化学发光信号的波长临近的、且只透过黑体辐射信号的波长。

8. 根据权利要求6所述的研究系统,其特征在于,

每个所述滤光片对应于一个所述成像光纤和一个所述高速相机;每组滤光片的成像光纤安装在所述固液火箭发动机壁面的同一孔壁内。

9. 根据权利要求5所述的研究系统,其特征在于,

所述固液发动机的内壁面内安装有光纤保护工装,用于安装所述成像光纤,所述成像光纤安装在所述光纤保护工装内,与所述固液发动机的内壁面形成倾斜角。

一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及固液火箭发动机领域,尤其涉及一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法及系统。

背景技术

[0002] 固液火箭发动机结合了固体火箭发动机和液体火箭发动机的特点,通常使用固体燃料和液体氧化剂的组合。这种组合结构决定了固液火箭发动机独特的燃烧方式,工作时封闭在药柱内部的火焰通过对流、辐射换热加热固体燃料,固体燃料受热后热解、气化,在主燃烧室内与氧化剂掺混、燃烧。

[0003] 研究固液火箭发动机的燃烧特性需要深入了解其化学反应机理。目前常用的是使用化学发光成像,在发动机后燃烧室开凿大面积光学窗口,或者使用平板燃烧器,采集一种特定化学发光组分的图像,如 CH^* 、 OH^* ,然后对化学发光图像进行分析。但是固液火箭发动机在燃烧过程中,部分燃料未完全热解,其固体颗粒会产生很强的黑体辐射,干扰化学发光信号,因此常用方法所得到的化学发光图像并不准确,进而无法准确反映发动机内燃烧的化学反应过程。

发明内容

[0004] 本发明提供了一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法及系统,以解决现有技术中获得的固液火箭发动机燃烧室内火焰图像含有黑体辐射、化学发光图像不真实的问题。

[0005] 在本发明的第一个方面,提供一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法,所述研究方法包括:

[0006] 步骤100.使用高速相机在包括化学发光物质对应波长的多波长下对标准黑体炉成像,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在多波长下每个波长处的辐射强度,得到所述高速相机在相应波长下的响应;

[0007] 步骤200.使用所述高速相机采集固液火箭发动机燃烧室内的火焰在多个波长下每个波长处辐射信号的图像;

[0008] 步骤300.根据所述高速相机在相应波长下的响应,拟合出化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,结合化学发光物质对应波长处的火焰图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

[0009] 进一步地,每个波长对应于一个中心波长的滤光片,所述多波长包括多组含有不同化学发光物质对应波长的滤光片,每组滤光片包括一种化学发光物质对应波长的滤光片和其波长相邻的至少两个只透过黑体辐射信号的、波长不同的滤光片。

[0010] 进一步地,所述高速相机经过每组滤光片采集的固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像包括含有一种化学发光物质信号和黑体辐射信号的火焰图像、至少两个只含有黑体辐射信号的火焰图像。

[0011] 进一步地,所述研究方法还包括滤除黑体辐射的方法:

[0012] 将至少两个只含有黑体辐射的图像分别除以对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在对应波长下的黑体辐射强度;

[0013] 根据对应波长下的黑体辐射强度,结合理论黑体辐射曲线,拟合得到黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度;

[0014] 黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度乘以化学发光物质对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像;

[0015] 化学发光物质对应波长处的火焰图像减去化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,能够滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

[0016] 进一步地,所述高速相机由所述固液发动机的点火信号同步触发。

[0017] 在本发明的第二个方面,提供一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究系统,所述研究系统包括:

[0018] 不同波长的多组滤光片,其波长范围包括对应于化学发光物质及其临近的波长;

[0019] 高速相机,通过成像光纤连接每个滤光片,以采集不同波长下每个波长处的图像;

[0020] 标准黑体炉,通过所述高速相机在不同波长下对所述标准黑体炉成像,得到所述标准黑体炉在不同波长下图像的像素值;

[0021] 固液火箭发动机,所述成像光纤能够安装在所述固液发动机的壁面内,通过所述高速相机采集与所述标准黑体炉相同波长下的固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像;

[0022] 图像拟合模块,连接所述高速相机并接受采集的图像,利用所述标准黑体炉在不同波长下图像的像素值,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在不同波长下每个波长处的辐射强度,得到所述高速相机在相应波长下的响应;

[0023] 图像处理模块,连接所述图像拟合模块,基于所述高速相机在相应波长下的响应,利用临近化学发光物质对应波长处的火焰图像,拟合得到黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度,结合化学发光物质对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

[0024] 进一步地,所有滤光片的带宽相同,波长不同,每组滤光片的波长范围覆盖一种化学发光物质对应的波长。

[0025] 进一步地,每组所述滤光片的数量至少为3个,其中一个为透过一种化学发光信号的波长,至少两个是与所述透过一种化学发光信号的波长临近的、且只透过黑体辐射信号的波长。

[0026] 进一步地,每个所述滤光片对应于一个所述成像光纤和一个所述高速相机;每组滤光片的成像光纤安装在所述固液火箭发动机壁面的同一孔壁内。

[0027] 进一步地,所述固液发动机的内壁面内安装有光纤保护工装,用于安装所述成像光纤,所述成像光纤安装在所述光纤保护工装内,与所述固液发动机的内壁面形成倾斜角。

[0028] 本发明和现有技术相比具有如下有益效果:本发明中借助标准黑体炉,可以标定高速相机在化学发光物质对应波长下的响应,能够拟合出化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,通过采集固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像,结合数字图像处理,从火焰图像中减去理论黑体辐射图像,滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射,从而能

够提取化学发光物质对应波长处火焰图像中的流场化学发光动态信息,开展化学反应流场动力学研究。

附图说明

[0029] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引申获得其它的实施附图。

[0030] 图1为本发明实施例中固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法的流程图;

[0031] 图2为本发明实施例中使用标准黑体炉进行响应标定的结构示意图;

[0032] 图3为本发明实施例中固液火箭发动机燃烧室内火焰光学成像的结构示意图;

[0033] 图4为本发明实施例中得到的一组固液火箭发动机内燃场火焰含黑辐射的化学发光图像;

[0034] 图中标号:

[0035] 1-成像光纤,2-滤光片,3-高速相机,4-标准黑体炉,5-光纤保护工装,6-前燃烧室,7-主燃烧室,8-后燃烧室,9-药柱。

具体实施方式

[0036] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0037] 如图1所示,本发明提供了一种固液火箭发动机火焰动力学特性研究方法,所述研究方法包括:

[0038] 步骤100.使用高速相机在包括化学发光物质对应波长的多波长下对标准黑体炉成像,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在多波长下每个波长处的辐射强度,得到所述高速相机在相应波长下的响应;

[0039] 步骤200.使用所述高速相机采集固液火箭发动机燃烧室内的火焰在多个波长下每个波长处辐射信号的图像;

[0040] 步骤300.根据所述高速相机在相应波长下的响应,拟合出化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,结合化学发光物质对应波长处的火焰图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

[0041] 本发明中,每个波长对应于一个中心波长的滤光片,所述多波长包括多组含有不同化学发光物质对应波长的滤光片,每组滤光片包括一种化学发光物质对应波长的滤光片和其波长相邻的至少两个只透过黑体辐射信号的、波长不同的滤光片,可以每次采集多种化学发光物质信号。

[0042] 所述高速相机经过每组滤光片采集的固液发动机燃烧室内的火焰图像包括含有一种化学发光物质信号和黑体辐射信号的火焰图像、至少两个只含有黑体辐射信号的火焰图像。

[0043] 实施过程中,可以先选定化学发光物质对应的波长(如波长310nm对应OH*),然后在此波长附近选择若干只透过黑体辐射的参考波长,由标准黑体辐射曲线得到黑体在以上波长的辐射强度,使用高速相机和滤光片在相应波长下对标准黑体炉成像,高速相机拍摄到的黑体炉图像的像素值除以标准黑体在相应波长下的辐射强度,能够得到高速相机在相应波长下的响应。

[0044] 由于固液火箭发动机在燃烧过程中,部分燃料未完全热解,其固体颗粒会产生很强的黑体辐射,所以通过化学发光物质对应波长的滤光片采集的火焰图像,含有化学发光信号和黑体辐射信号,而通过至少两个只透过黑体辐射信号的滤光片采集到的火焰图像,只含有黑体辐射。

[0045] 其中,所述高速相机由所述固液火箭发动机的点火信号同步触发,以在发动机点火燃烧的同时采集燃烧室内部燃烧过程。

[0046] 结合通过上述滤光片采集的图像,对固液火箭发动机燃烧室的火焰图像进行数据处理滤除黑体辐射,包括光谱强度分析、图像切割和数字图像叠加方法。具体为滤除黑体辐射的方法,以一组滤光片为例:

[0047] 将至少两个只含有黑体辐射的图像分别除以对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在对应波长下的黑体辐射强度;

[0048] 根据对应波长下的黑体辐射强度,结合理论黑体辐射曲线,拟合得到黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度;

[0049] 黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度乘以化学发光物质对应波长下的响应,得到固液火箭发动机燃烧室内火焰在化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像;

[0050] 化学发光物质对应波长处的火焰图像减去化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,能够滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

[0051] 本发明借助标准黑体炉,可以标定高速相机在化学发光物质对应波长下的响应,能够拟合出化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,通过采集固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像,结合数字图像处理,从火焰图像中减去理论黑体辐射图像,滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射,从而能够提取化学发光物质对应波长处火焰图像中的流场化学发光动态信息,开展化学反应流场动力学研究。

[0052] 在本发明的第二个方面,还提供了一种基于上述研究方法的固液火箭发动机火焰动力学特性研究系统,所述研究系统包括不同波长的多个滤光片、高速相机、标准黑体炉、固液火箭发动机、图像拟合模块和图像处理模块。

[0053] 不同波长的多组滤光片,其波长范围包括对应于化学发光物质及其临近的波长。

[0054] 高速相机,通过成像光纤连接每个滤光片,以采集不同波长下每个波长处的图像,高速相机的采集频率均为1kHz,曝光时间均为1ms。

[0055] 标准黑体炉,通过所述高速相机在不同波长下对所述标准黑体炉成像,得到所述标准黑体炉在不同波长下图像的像素值,如图2所示。

[0056] 固液火箭发动机,所述成像光纤能够安装在所述固液发动机的壁面内,通过所述高速相机采集与所述标准黑体炉相同波长下的固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像,如图3所示。固液火箭发动机燃烧室内的药柱基体可由3D打印技术一体成型,选用材料为常规的3D打印材料例如ABS、铝合金、陶瓷等,即可参与燃烧也可不参与燃烧,燃料介质为石蜡基燃

料、HTPB、PE等固液火箭发动机常规燃料。

[0057] 图像拟合模块,连接所述高速相机并接受采集的图像,利用所述标准黑体炉在不同波长下图像的像素值,结合标准黑体辐射曲线获得黑体在不同波长下每个波长处的辐射强度,得到所述高速相机在相应波长下的响应。

[0058] 图像处理模块,连接所述图像拟合模块,基于所述高速相机在相应波长下的响应,利用临近化学发光物质对应波长处的火焰图像,拟合得到黑体在化学发光物质对应波长下的辐射强度,结合化学发光物质对应波长下的响应,得到固液发动机燃烧室内火焰在化学发光物质对应波长处的理论黑体辐射图像,以滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射。

[0059] 所述固液发动机的内壁面内安装有光纤保护工装,用于安装所述成像光纤,所述成像光纤安装在所述光纤保护工装内,与所述固液发动机的内壁面形成倾斜角。光纤保护工装使用较小尺寸的蓝宝石窗口将镜头和燃烧室内高位气体隔离开来,保护成像光纤不被破坏。成像光纤是一种特殊定制的大视场角石英光纤,使用自聚焦镜头进行成像,视场角为 50° 。

[0060] 每组滤光片的成像光纤安装在所述固液火箭发动机壁面的同一孔壁内,可在前燃烧室壁面上以一定角度倾斜地放置多组成像光纤,通过不同中心波长的滤光片滤光后,连接到高速相机,以采集每组多波长下燃烧室内的火焰图像。

[0061] 本发明中,所述滤光片的带宽相同,波长不同,每组滤光片的波长范围覆盖一种化学发光物质对应的波长。每个所述滤光片对应于一个所述成像光纤和一个所述高速相机,高速相机通过滤光片和成像光纤采集一个波长下的图像。

[0062] 每组滤光片的数量至少为3个,其中一个为透过一种化学发光信号的波长,至少两个是与所述透过一种化学发光信号的波长临近的、且只透过黑体辐射信号的波长。3个以一种化学发光物质对应波长为中心的滤光片组成一组,本发明中,可以选择对应于多种化学发光物质的不同波长滤光片,每种化学发光物质对应的波长和两个临近的只透过黑体辐射信号的波长组成一组,以标定响应,滤除该化学发光物质对应波长下采集的火焰图像中的黑体辐射。

[0063] 在一个实施例中,滤光片的数量为3个,滤光片直径为25.4mm,一个中心波长为310nm,带宽10nm,透过的是OH*信号和黑体辐射;第二个中心波长为340nm,带宽10nm,透过的是黑体辐射信号;第三个中心波长为290nm,带宽10nm,透过的是黑体辐射信号。

[0064] 在一个具体实施例中,选择3个波长的滤光片,包括波长1(波长1对应某化学发光物质,如310nm对应OH*)、波长2和波长3,其过程为:

[0065] (1) 由标准黑体辐射曲线得到黑体在这三个波长下的辐射强度;然后使用成像光纤、滤光片和高速相机,对标准黑体炉在这三个波长下进行成像。

[0066] (2) 使用高速相机得到的图像的像素值,除以标准黑体在相应波长下的辐射强度,得到高速相机在三个波长下的响应1、响应2和响应3。

[0067] (3) 在前燃烧室壁面打孔,安装光纤保护工装,光纤保护工装内可放置多个成像光纤。

[0068] (4) 在光纤保护工装内对应于3个波长安装三根成像光纤,由滤光片滤光后,连接高速相机,采集固液火箭发动机燃烧室内部的火焰在波长1、波长2、和波长3处的图像。其中

在波长1下得到的为含有化学发光和黑体辐射的图像1,波长2和波长3下得到的为黑体辐射图像2和图像3。

[0069] (5) 用图像2和图像3除以响应2和响应3,得到发动机燃烧室内火焰在波长2和波长3下的黑体辐射强度2和强度3。

[0070] (6) 由强度2和强度3,用理论黑体辐射曲线,拟合黑体在波长1下的辐射强度1。

[0071] (7) 辐射强度1乘以响应1,得到发动机燃烧室内火焰在波长1处的理论黑体辐射图像1'。

[0072] (8) 用图像1减去理论黑体图像1',滤除发动机燃烧室内未完全热解燃料的黑体辐射,提取流场化学发光动态信息。

[0073] 通过本实施例的一种实施方案可以得到一组固液火箭发动机内燃场火焰含黑辐射的化学发光图像,如图4所示。

[0074] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

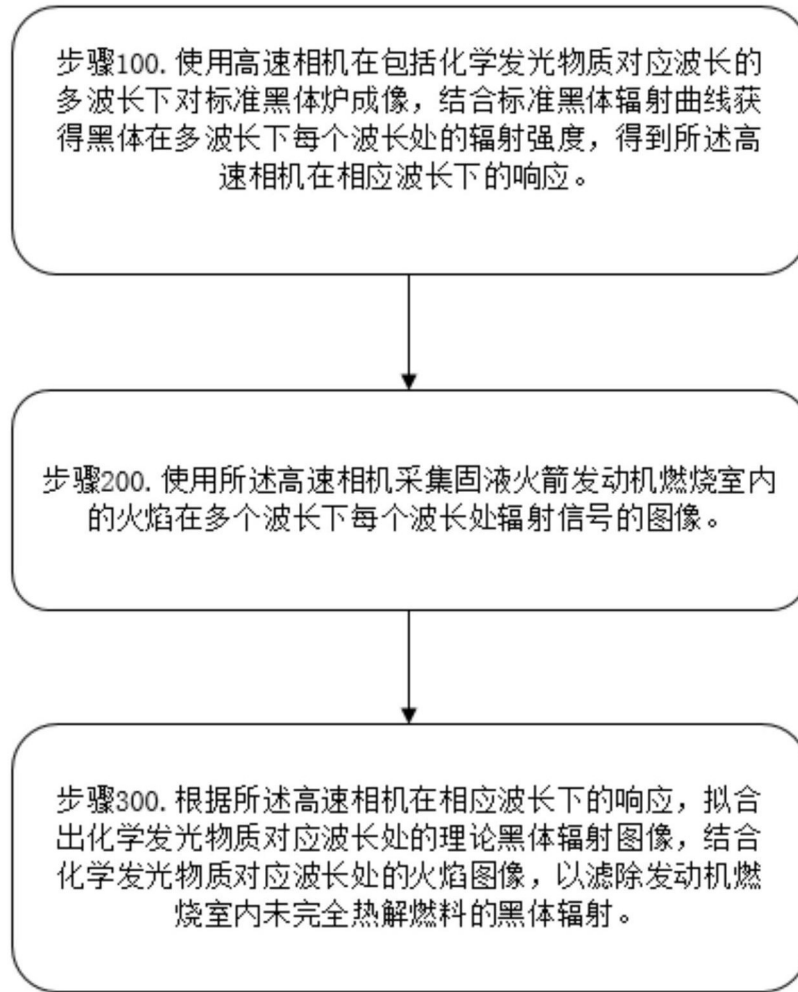


图1

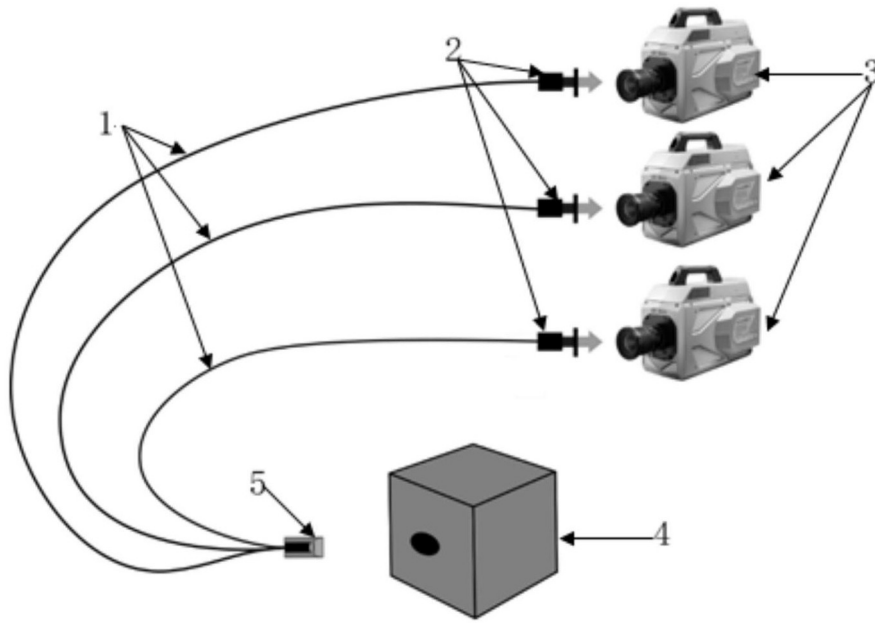


图2

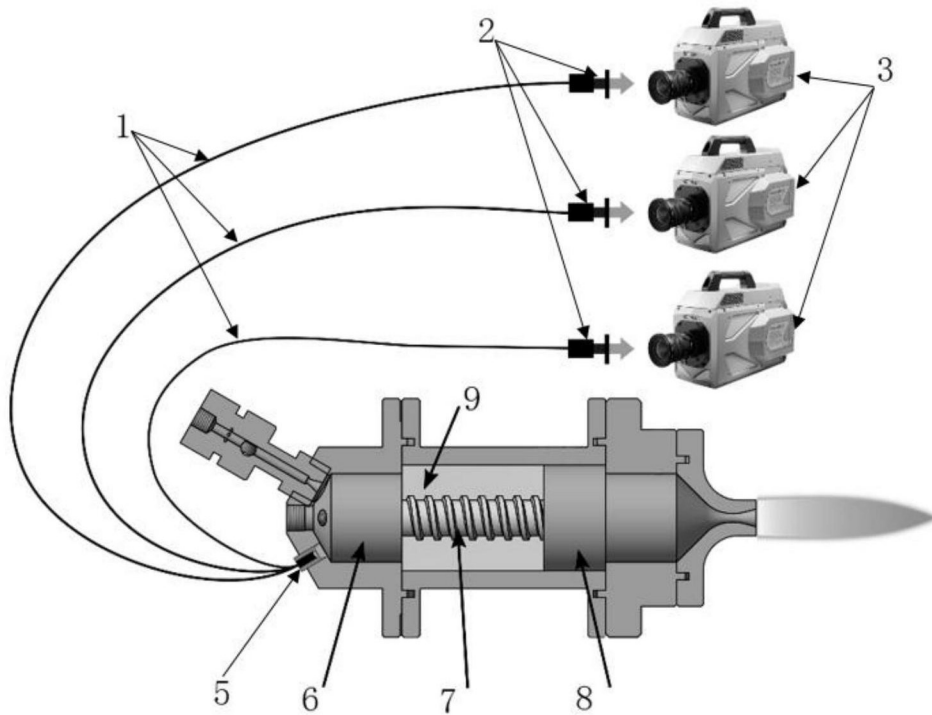


图3

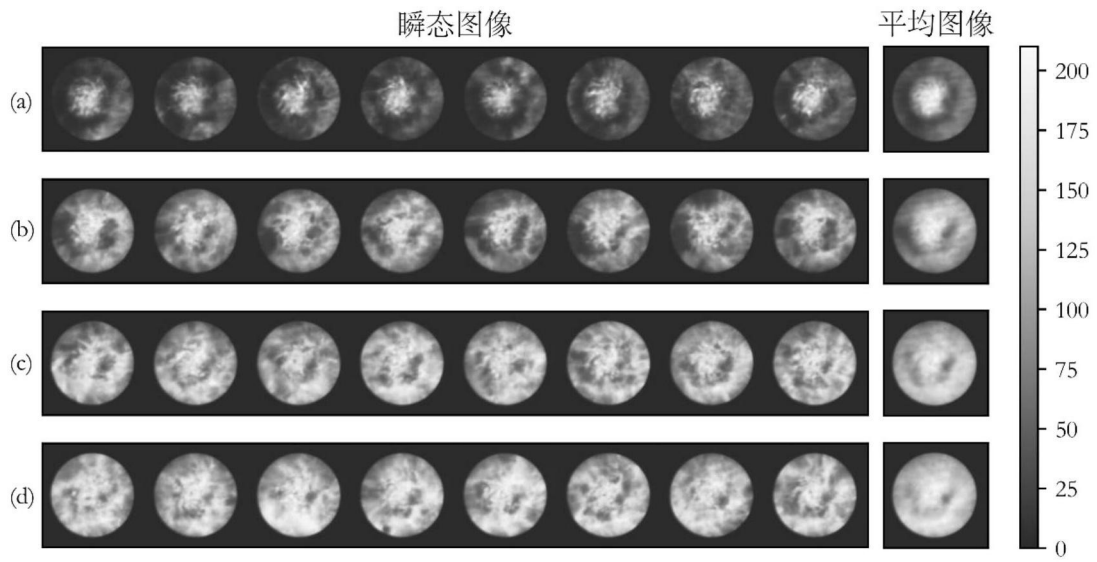


图4